

## تحلیل و شبیه‌سازی آنتن موج نشستی در پدیده گرمایش آئرو دینامیکی وسایل پرنده ماوراء صوت در باند X

شهریار توانائی پور<sup>۱</sup>، محمدعلی جزو وزیری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۲- دکتری، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>

(دریافت: ۹۶/۰۹/۱۸؛ پذیرش: ۹۷/۰۲/۱۷)

### چکیده

در این پژوهش تأثیر گرمایش آئرو دینامیکی بر روی عملکرد آنتن‌های موج نشستی در پرتابه‌های ماوراء صوت، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا با شبیه‌سازی آئرو دینامیکی پرتابه، دمای سطح آن به دست آورده شده است. سپس با شبیه‌سازی حرارتی آنتن موج نشستی طراحی شده در باند فرکانسی X، دمای آن با فرض قرار گرفتن سطح بالایی آن در سطح خارجی پرتابه، محاسبه شده است. در گام بعدی با بررسی تغییرات شکل آنتن و تغییر خصوصیات مواد به کار رفته در آن به بررسی تغییر در عملکرد آنتن پرداخته شده است. مهم‌ترین تغییر عملکرد در پارامتر  $S_{11}$  بوده که در دمای  $1880\text{ K}$  دچار جابه‌جایی فرکانسی در حدود  $120\text{ MHz}$  شده است. از دیگر بررسی‌های انجام شده می‌توان به تغییر جهت پرتو اصلی و همچنین سطح گلبرگ کناری اول نسبت به تغییرات دما اشاره کرد.

### واژگان کلیدی

گرمایش آئرو دینامیکی، آنتن موج نشستی، رژیم ماوراء صوت، دما.

### ۱- مقدمه

می‌دهد. یکی از بارزترین خصوصیات آنتن‌های موج نشستی قابلیت اسکن فضایی پرتو با تغییر فرکانس است [۳-۲]. که برای کاربردهای راداری بسیار مفید و کاربردی است [۴-۶]. از دیگر مزیت‌های این آنتن‌ها می‌توان به تغذیه ساده آن‌ها، جهت‌گیری بالا، سازگاری با فناوری مدار چاپی، دارا بودن ساختاری ساده و همچنین ساخت ساده و قابلیت مجتمع سازی با دیگر عناصر مدار اشاره کرد [۷].

آنتن از آنجایی که باید با محیط اطرافش در تماس باشد، عوامل محیطی می‌توانند بر روی آن تأثیرگذار باشند. یکی از عوامل محیطی بسیار مهم، دما است که در سرعت‌های بالای پرتابه‌های مافوق صوت بر روی سطح بدنه و محیط اطراف آن تغییرات چشم‌گیری را خواهد داشت و به شدت افزایش پیدا می‌کند. این افزایش دما می‌تواند با تغییر در شکل فیزیکی و خواص مواد به کار رفته در آنتن عملکرد آنتن را تحت تأثیر خود قرار دهد. بنابراین اگر قرار است آنتنی را بر روی سطح یک پرتابه ماورا صوت نصب شود بایستی این عامل و تأثیراتش را در نظر داشت و آن‌ها را بررسی کرد.

در گذشته کارهایی را می‌توان یافت که تأثیر دما را بر روی آنتن‌های ریز نواری بررسی کرده‌اند از اولین کارها می‌توان به مقاله کارور و مینک [۸] در سال ۱۹۸۱ اشاره کرد که مقاله‌ای

امروزه رادارها کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف از جمله نظامی، صنعتی و تجاری پیدا کرده‌اند. یکی از کاربردهای سامانه راداری استفاده از آن بر روی پرتابه‌های مافوق صوت است که می‌تواند به عنوان چشم و گوش پرتابه عمل کند. رادار سامانه‌ای است که انرژی الکترومغناطیسی تشعشع می‌کند و اکوی برگشتی از اجسام اطراف را دریافت می‌کند و با استفاده از همین اکوی برگشتی قابلیت آشکار سازی اهداف، تعیین مکان و سرعت آن‌ها را دارا است. یک سامانه راداری از زیر بخش‌های گوناگونی تشکیل شده است یکی از مهم‌ترین این زیر بخش‌ها آنتن رادار است که وظیفه ارتباط بین محیط و سامانه راداری را بر عهده دارد. آنتن در لغت‌نامه وبستر به‌عنوان یک وسیله معمولاً فلزی برای تشعشع یا دریافت موج‌های رادیویی تعریف شده است [۱]. آنتن انواع گوناگونی از جمله آنتن دوقطبی و تک‌قطبی، آنتن‌های حلقوی، آنتن‌های ریز نواری و غیره دارند که هر یک را می‌توان در کاربرد خاصی استفاده کرد. یکی از انواع آنتن‌ها، آنتن‌های موج نشستی هستند. آنتن موج نشستی در واقع یک ساختار موج‌بری است که دارای مکانیسمی است که اجازه نشت توان را در سرتاسر آن

\* نویسنده مسئول: mohammad.ali.vaziri@chmail.ir

## ۱-۲- انتخاب پرتابه و تحلیل آئرودینامیکی

در این پژوهش پیکربندی پرتابه پرتابه نمونه ابر صوتی به عنوان پرنده‌ی ماوراء صوت در نظر گرفته شده است. مشخصات پرتابه در نظر گرفته شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات پرتابه‌ی مورد نظر

نوع پرتابه	بالستیک
طول	۲۲ متر
قطر	۱/۵ متر
وزن	۲۶ تن
موتور	سوخت جامد دومرحله‌ای
برد مؤثر	۲۵۰۰ کیلومتر
حداکثر سرعت	ماخ ۱۴

با توجه به شرایط پروازی پرتابه‌ی مورد نظر و همچنین شرایط اتمسفر در ارتفاعات مختلف، حالت بحرانی دمایی در طول پرواز، حدوداً در ماخ ۶ و ارتفاع ۳۰ کیلومتری رخ می‌دهد. از این رو تحلیل‌های آئرودینامیکی در این ماخ و ارتفاع پروازی صورت گرفته است. با استفاده از جداول اتمسفر استاندارد، شرایط محیطی در این ارتفاع در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول (۲): شرایط اتمسفر در ارتفاع ۳۰ کیلومتری

پارامتر	مقدار	واحد
دما	۲۲۶	درجه کلوین
فشار	۱۱۹۷	پاسکال
چگالی	۰/۰۱۸	کیلوگرم بر متر مکعب
سرعت صوت	۳۰۲	متر بر ثانیه
لزجت	$1/47 \times 10^{-7}$	کیلوگرم بر متر ثانیه

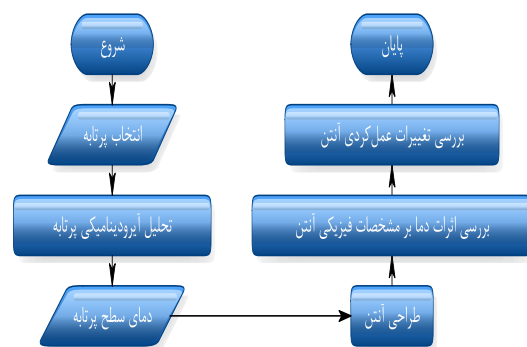
همچنین به دلیل نوع حرکت پرتابه‌های بالستیک، زاویه حمله در اکثر مسیر پروازی ناچیز بوده، از این رو تحلیل‌های صورت گرفته در زاویه حمله صفر درجه انجام شده است. شبکه محاسباتی در این تحلیل به صورت با سازمان در لایه مرزی (اطراف پرتابه) و به صورت بی‌سازمان در سایر نقاط میدان بوده که مجموعاً دارای ۷/۲ میلیون شبکه محاسباتی است. با توجه به تعداد نسبتاً زیاد سلول‌های محاسباتی، احتیاج به استفاده از پردازش موازی بوده که برای این منظور از آزمایشگاه پردازش موازی استفاده شده است. برای حل جریان سیال، با استفاده از نرم‌افزار آنسیس فلونت، معادلات ناویر استوکس در حالت پایا، به روش حجم محدود و به صورت چگالی پایه و با دقت مرتبه دوم مجازسازی شده است. برای محاسبه شارها از روش بالادست AUSM استفاده شده و همچنین برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل آشفتگی SST k-omega استفاده شده است. ملاک توقف حل نیز کاهش مانده‌ها تا  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. پس از

تحت عنوان فناوری آنتن‌های ریز نواری است که در بخشی از آن به بررسی دمایی این آنتن‌ها پرداخته شده است. کار بابو و کومار [۹] که در سال ۱۹۹۹ انجام شده به حساسیت دمایی آنتن‌های ریزنواری پرداخته شده است که از لحاظ بررسی دمایی کاری تقریباً مشابه با مقاله قبلی است. در سال‌های اخیر نیز کارهایی برای بررسی دمایی آنتن صورت پذیرفته است [۱۰-۱۱]. در تمامی این مقالات دما در حالت بیشینه حدود  $500\text{ K}$  است که در مورد پرتابه‌های مافوق صوت این دما بسیار ناچیز است. در کارهای گذشته کاری جامع بدین صورت که با استفاده از بررسی‌های آئرودینامیکی و استخراج داده‌های این بررسی و به کارگیری این داده‌ها برای انتخاب مواد سازنده آنتن و طراحی آن با توجه به فیزیک مسئله و در ادامه بررسی تأثیر دما بر روی آنتن با استفاده از شبیه‌سازی، انجام نگرفته است.

در این مقاله ابتدا با انجام شبیه‌سازی‌های آئرودینامیکی دمای سطح پرتابه مافوق صوت نمونه که در این پژوهش پیکربندی آن مشابه با پرتابه نمونه ابر صوتی انتخاب شده است، به دست آورده می‌شود. سپس با توجه به نتایج دمایی و ملاحظاتی از جهت انتخاب مواد سازنده، آنتن موج نشستی برای کار در باند فرکانسی X طراحی می‌شود. بعد از طراحی آنتن با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی آئرودینامیکی به شبیه‌سازی چند فیزیکی ترمودینامیکی و مکانیکی آنتن برای پی بردن به نحوه تغییر شکل یافتن آن پرداخته می‌شود. در گام بعدی تغییر پارامتر مهم بعدی یعنی ضریب گذردهی نسبی زیرلایه با دما به شکل تقریبی به دست آورده می‌شود و در انتها نیز نوبت به بررسی تغییرات عملکرد آنتن با دما می‌رسد.

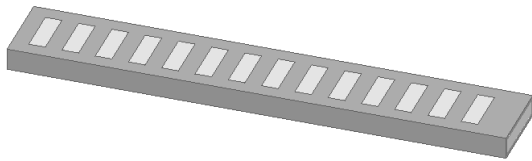
## ۲- مراحل انجام کار

روند کلی مراحل انجام کار در فلوچارت شکل (۱) آورده شده است که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته خواهد شد.



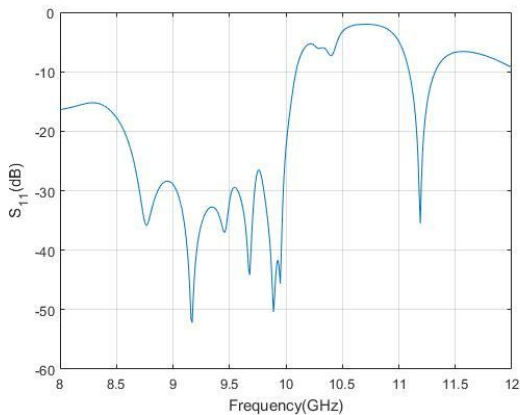
شکل (۱): فلوچارت مراحل انجام کار

دارای شیارهای عرضی تناوبی است در باند X طراحی شده است که تئوری مربوط به این نوع آنتن به طور کامل در [۱۲] آورده شده است. این آنتن از موج‌بری با طول ۱۵۰ mm، عرض ۱ mm، ارتفاع ۲۲ mm و ضخامت فلز ۱ mm ساخته شده است. بر روی این موج‌بر تعداد ۱۴ شیار مستطیلی با طول ۱۵ mm، عرض ۵ mm و تناوب ۱۰ mm ایجاد شده است. آنتن طراحی شده که طول آن در راستای محور Y قرار دارد در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): آنتن موج نشستی طراحی شده

برای تغذیه و تطبیق بار در انتهای این آنتن باید دمای بالا این آنتن را مد نظر قرار داد برای این منظور می‌توان با استفاده از خط انتقالی که انتهای آن به بخش‌های داخلی پرتابه ختم می‌شود و در آن بخش‌ها می‌توان از سامانه‌های خنک‌کاری استفاده کرد، انجام داد. این آنتن با تک مود  $TE_{10}$  تحریک می‌شود. شبیه‌سازی این آنتن با استفاده از شبیه‌سازی تمام‌موج نرم‌افزار HFSS [۱۳] انجام می‌گیرد. یکی از پارامترهای مهم آنتن  $S_{11}$  آن است که در شکل (۵) این پارامتر را در باند فرکانسی مورد طراحی آورده شده است.

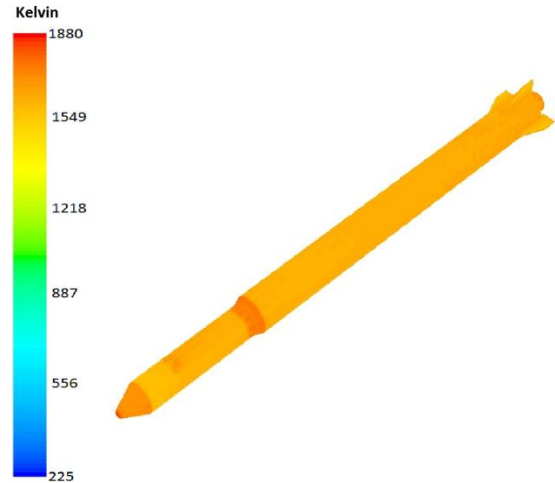


شکل (۵): پارامتر  $S_{11}$  آنتن

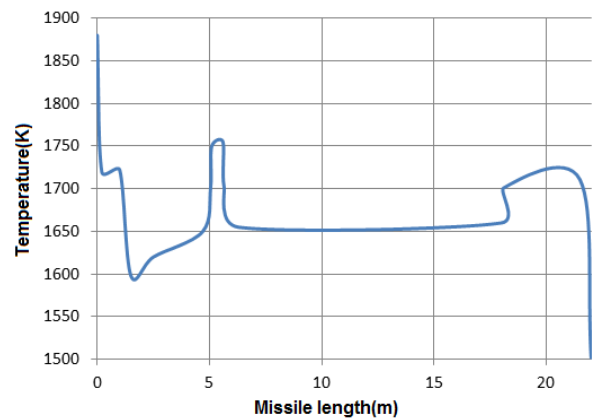
همان‌گونه که از نمودار شکل (۵) پیداست آنتن در بازه ۸GHz تا ۱۰/۱ GHz و ۱۱/۱ GHz تا ۱۱/۳۵ GHz از باند X دارای پارامتر  $S_{11}$  کمتر از -۱۰dB است که مناسب است.

همان‌طور که در مقدمه نیز بیان گردید مشخصه بارز آنتن موج نشستی که برای کاربردهای راداری نیز مفید است، چرخش پرتو اصلی آنتن با تغییر فرکانس است. این آنتن دارای بازه اسکن

حل توزیع دما روی سطح پرتابه به‌دست‌آمده که در شکل‌های (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل (۲): کانتور دما سطح پرتابه

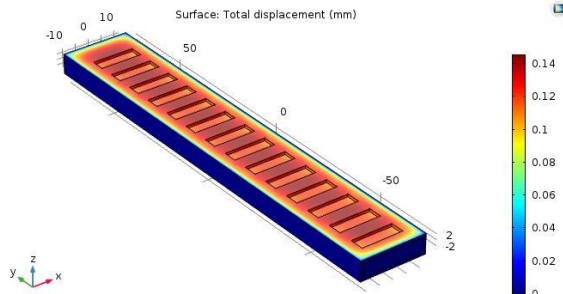


شکل (۳): توزیع دما بر روی سطح پرتابه

## ۲-۲- طراحی آنتن

حال با توجه به نتایج قسمت قبل نوبت به مرحله طراحی آنتن منصوب بر پرتابه می‌رسد. همان‌طور که از نمودار شکل (۳) پیداست دما بر روی بدنه پرتابه به ۱۸۸۰ K نیز می‌رسد. در این دما نمی‌توان از هر ماده‌ای برای ساخت آنتن بهره برد. برای مثال بدنه آنتن‌های متداول عموماً از مس ساخته می‌شود که دارای نقطه ذوبی برابر با ۱۳۵۸ K است که عملاً در این کاربرد غیر قابل استفاده است. برای زیرلایه‌ها نیز به همین شکل است که دمای ذوبی بسیار پایین‌تر دارند. با توجه به این نکات می‌بایست موادی برای بدنه آنتن و زیرلایه انتخاب شود که دارای شرایط عملیاتی باشند، برای این منظور با انتخاب تیتانیوم با نقطه ذوب ۱۹۴۱ K به عنوان بدنه موج‌بر آنتن و آلومینا با نقطه ذوب ۲۳۴۵ K برای زیرلایه به طراحی آنتن پرداخته شده است و آنتن موج نشستی که

نتیجه شبیه‌سازی برای بالاترین دمای بدنه که انتظار می‌رود بیشترین تغییرات شکل را داشته باشد آورده شده است.



شکل (۷): تغییر شکل آنتن در اثر دما

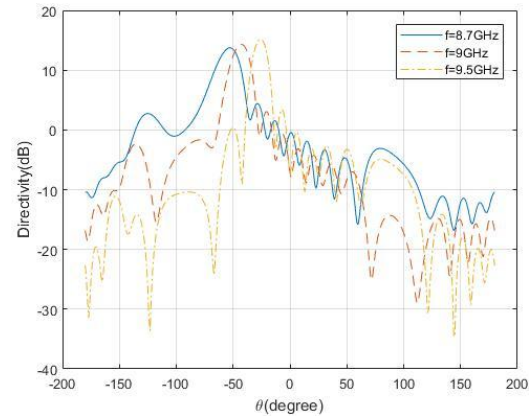
همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است بیشترین تغییر ابعاد آنتن حدود  $0.14 \text{ mm}$  است که در مقایسه با طول موج کاری که  $30 \text{ mm}$  است بسیار اندک است با توجه به این که نسبتشان  $0.0047$  است. در الکترومغناطیس می‌توان به راحتی از این مقدار صرف نظر کرد و تغییر ابعاد را صفر در نظر گرفت.

یکی دیگر از عوامل مهمی که بر عملکرد آنتن تأثیرگذار است گذردهی نسبی زیرلایه است که در گذشته و در کارهای قبلی برای آنتن‌های ریزنواری مورد بررسی قرار گرفته شده است، با تغییر دما این پارامتر آنتن نیز دچار تغییرات اندکی می‌شود. برای به دست آوردن مقدار دقیق ضریب گذردهی نسبی زیرلایه تنها راه دقیق انجام آزمایش‌های عملی است. برای مثال در اینجا بایستی دمای آلو مینا را تا  $1650 \text{ K}$  و  $1880 \text{ K}$  بالا برد سپس ضریب گذردهی نسبی را اندازه‌گیری کرد. در این مقاله با استفاده از تقریب خطی موجود در [۹-۸] و با فرض دو برابر بودن ضریب تغییرات ثابت دی‌الکتریک نسبت به ضریب انبساط طولی ضریب، گذردهی نسبی را در  $1650 \text{ K}$  و  $1880 \text{ K}$  به ترتیب  $9/4012$  و  $9/4355$  به دست آورده شده است که نسبت به دمای  $300 \text{ K}$  که دارای ضریب گذردهی نسبی  $9/2$  است، تغییراتی در حدود  $0.2$  را دارا است.

### ۳- نتایج

با توجه به داده‌هایی که در قسمت‌های قبل به دست آمد و با استفاده از شبیه‌سازی تمام‌موج نرم‌افزار HFSS به شبیه‌سازی آنتن مورد نظر پرداخته می‌شود. در گام اول  $S_{11}$  آنتن بررسی می‌شود. در شکل (۸) پارامتر  $S_{11}$  برای دو دمای  $1650 \text{ K}$  و  $1880 \text{ K}$  با دمای اتاق که طراحی در این دما انجام گرفته، مقایسه شده است.

مناسبی است به طوری که می‌توان با تغییر فرکانس از  $8.7 \text{ GHz}$  تا  $9.5 \text{ GHz}$  از  $-53$  تا  $-25$  درجه از فضا را اسکن کرد. در شکل (۶) راستاوری آنتن در فرکانس‌های  $8.7 \text{ GHz}$ ،  $9 \text{ GHz}$  و  $9.5 \text{ GHz}$  نشان داده شده است.



شکل (۶): راستاوری آنتن در فرکانس‌های  $8.7 \text{ GHz}$ ،  $9 \text{ GHz}$  و  $9.5 \text{ GHz}$

این آنتن در فرکانس  $9.5 \text{ GHz}$  دارای پهنای نیم توان پرتو  $13$  درجه می‌باشد و بیشینه راستاوری آن  $15/13 \text{ dB}$  است.

### ۳-۲- بررسی اثرات دما بر مشخصات فیزیکی آنتن

در مرحله قبل آنتن مورد نظر با الزامات ساخت آن، طراحی گردید. در گام بعدی به بررسی توزیع دمایی آنتن با استفاده از نرم‌افزار کامسول<sup>۱</sup> [۱۴] در دو نقطه از پرتابه پرداخته می‌شود. برای این منظور با فرض قرار گرفتن آنتن بر روی دو نقطه مختلف که دارای دماهای به ترتیب برابر با  $1880 \text{ K}$  و  $1650 \text{ K}$  هستند، به انجام شبیه‌سازی پرداخته شده است. برای انجام این شبیه‌سازی‌ها شرط دمایی ثابت مورد نظر در وجه بالایی اعمال شده است و بقیه وجوه از نظر شرایط مرزی آزاد قرار می‌گیرند. با توجه به این که موشک در شرایط پایدار دمایی بررسی می‌شود و همچنین ابعاد آنتن، دمای کل آنتن را می‌توان همان دمای سطحشان در نظر گرفت که البته این مورد با شبیه‌سازی نیز تأیید شده است.

در گام بعدی به تحلیل چند فیزیکی مکانیکی ترمودینامیکی این آنتن پرداخته می‌شود تا تغییر شکل احتمالی آنتن به علت تغییر دما که اگر از حدی بیشتر باشد می‌تواند بر عملکرد آنتن تأثیر بسیاری بگذارد، بررسی شود.

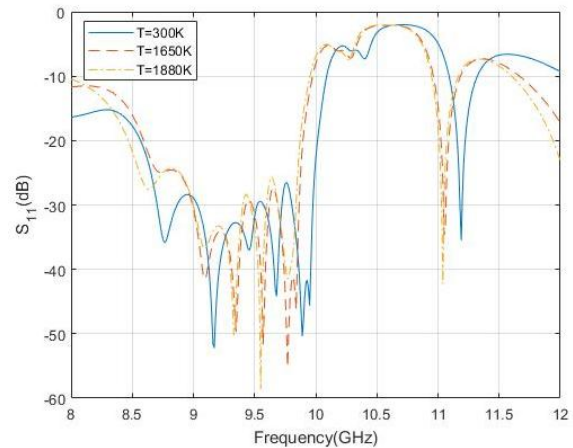
برای شبیه‌سازی چند فیزیکی ترمودینامیکی و مکانیکی نیز از نرم‌افزار کامسول بهره برده می‌شود. برای انجام این شبیه‌سازی فرض شده که سطح بالایی آنتن که با هوا در تماس است و آزاد است و بقیه وجه‌های آن در بدنه پرتابه ثابت شده‌اند در شکل (۷)

در ادامه به بررسی راستاوری آنتن که یکی از مشخصه‌های مهم آنتنی است پرداخته می‌شود. در شکل‌های (۹) و (۱۰) راستاوری آنتن برای فرکانس نمونه ۹/۵ GHz در زاویه عرضی ۹۰ درجه برای دماهای ۱۶۵۰ K و ۱۸۸۰ K در مقایسه با دمای اتاق رسم شده است.

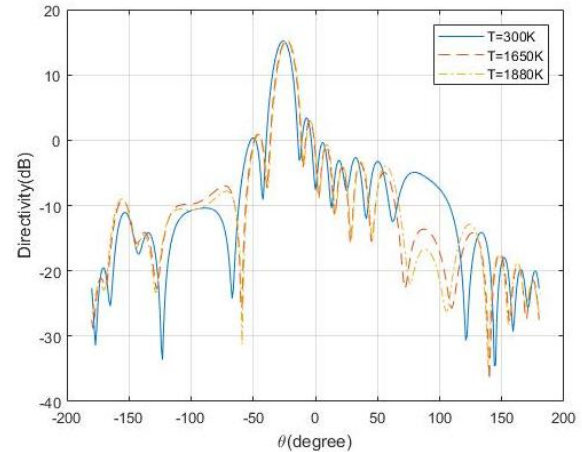
با توجه به نمودارها دریافته می‌شود که با افزایش دما پرتو اصلی آنتن به سمت راست جابه‌جا می‌شود هرچه دما بیشتر شود این جابه‌جایی نیز بیشتر خواهد بود. برای مثال راستای پرتو اصلی در دمای ۳۰۰ K، ۲۶- درجه بود در دمای ۱۶۵۰ K به ۲۳- درجه و در دمای ۱۸۸۰ K به ۲۲/۵- درجه منتقل می‌شود. تغییر دیگری که با افزایش دما رخ می‌دهد کاهش سطح گلبیگ کناری اول است در دمای ۳۰۰ K سطح گلبیگ کناری اول از ۱۱/۷۶ dB پایین‌تر است این عدد در دمای ۱۶۵۰ K به ۱۲/۲۹ dB و در ۱۸۸۰ K به ۱۲/۳۱ dB می‌رسد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

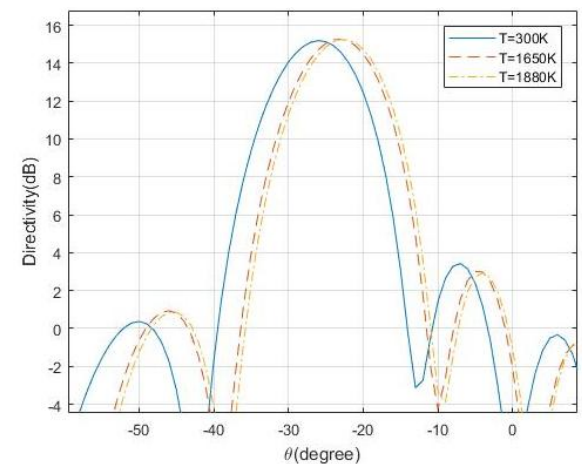
در این مقاله، ابتدا با انتخاب پرتابه‌ای و تحلیل آئرویدینامیکی پرتابه مورد نظر استخراج داده‌های دمایی سطح آن صورت گرفت سپس آنتن موج نشستی به منظور نصب بر روی این پرتابه طراحی گردید و در ادامه به بررسی تغییرات عملکردی آنتن در دماهای مختلف سطح پرتابه پرداخته شد. برخی پارامترهای عملکردی آنتن از جمله  $S_{11}$ ، جهت‌گیری پرتو اصلی و سطح گلبیگ کناری اول بررسی شد.  $S_{11}$  یکی از مهم‌ترین پارامترهای آنتن است و می‌توان با توجه به فرکانس‌های رزونانسی که در نمودار این پارامتر دیده می‌شود تغذیه را انجام داد. در بررسی صورت گرفته مشاهده شد که با افزایش دما نمودار  $S_{11}$  به سمت چپ محور فرکانسی جابه‌جا می‌شود و این جابه‌جایی مقداری چشم‌گیر می‌تواند باشد. پس از بررسی پارامتر  $S_{11}$  که نقش بسیار مهمی در تغذیه آنتن دارد پارامتر دیگر آنتن که در دریافت و ارسال و کشف هدف مهم است راستاوری آنتن است که بایستی جهت‌گیری آن به صورت دقیق مشخص باشد با شبیه‌سازی‌های صورت گرفته این مشخصه آنتن نیز با افزایش دما دچار تغییر می‌شود و این تغییر می‌تواند در حدود ۴ درجه باشد. پارامتر مهم دیگر آنتن که همانا سطح گلبیگ کناری است که اگر از سطحی بیشتر شود عملکرد آنتن را خصوصاً در سامانه‌های راداری با اختلال شدید مواجه می‌کند نیز با تغییر دما دچار تغییر می‌شود که اتفاقاً با افزایش دما بهبود این مؤلفه مشاهده شد. در نهایت توجه به اثر دما بر آنتن رادار در پرتابه‌های مافوق صوت دارای اهمیت بسیار است. عدم توجه به این پارامتر ممکن است موجب از کار افتادن سامانه راداری یا اختلال و خطا در کشف و ردگیری



شکل (۸): پارامتر  $S_{11}$  برای دماهای ۳۰۰ K، ۱۶۵۰ K و ۱۸۸۰ K



شکل (۹): راستاوری آنتن برای دماهای ۳۰۰ K، ۱۶۵۰ K و ۱۸۸۰ K



شکل (۱۰): راستاوری آنتن برای دماهای ۳۰۰ K، ۱۶۵۰ K و ۱۸۸۰ K با بزرگ‌نمایی

با توجه به نمودارها دریافته می‌شود که با افزایش دما نمودار  $S_{11}$  دچار جابه‌جایی به سمت چپ می‌شود هرچه دما بیشتر شود این جابه‌جایی نیز بیشتر خواهد بود. برای مثال فرکانس رزونانسی که در دمای ۳۰۰ K ۹/۶۷ GHz بود در دمای ۱۶۵۰ K به ۹/۵۷ GHz و در دمای ۱۸۸۰ K به ۹/۵۵ GHz منتقل می‌شود.

- [7] A. A. Oliner and D. R. Jackson, "Leaky-wave antennas," in *Antenna Engineering Handbook*, J. L. Volakis, Ed., 4th ed. New York: Mc- Graw-Hill, ch. 11, Jun. 2007.
- [8] K. Carver, and J. Mink, "Microstrip antenna technology," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. AP.29, no. 1, pp. 1-24, January 1981.
- [9] S. Babu and G. Kumar, "Parametric study and temperature sensitivity of microstrip antennas using an improved linear transmission line Model," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 2, pp. 221-226, February 1999.
- [10] A. Elrashidi, K. Elleithy, and H. Bajwa, "The performance of a cylindrical microstrip printed antenna for TM<sub>10</sub> mode as a function of temperature for different substrates," *International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN)*, vol. 3, no. 3, pp. 1-18, September 2011.
- [11] Yadav, R. Kumar, J. Kishor, and R. Lal Yadava, "Effects of temperature variations on microstrip antenna," *International Journal of Networks and Communications* 3.1, pp. 21-24, 2013.
- [12] J. Liu, D. R. Jackson, and Y. Long, "Modal analysis of dielectric-filled rectangular waveguide with transverse slots," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 9, pp. 3194-3203, Sep. 2011.
- [13] H. F. S. S. Ansys, "v15," ANSYS Corporation Software, Pittsburgh, PA, USA, 2014.
- [14] C. O. M. S. O. L. Multiphysics, "v. 5.2 a. www. comsol. com. COMSOL AB, Stockholm,".

اهداف شود که ممکن است خسارات جبران ناپذیری را به بار آورد.

## ۵- مراجع

- [1] C. Balanis, "A Antenna theory: analysis and design," John Wiley & Sons, 2016.
- [2] D.-J. Kim and L. Jeong-Hae, "Beam scanning leaky-wave slot antenna using balanced CRLH waveguide operating above the cutoff frequency," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61.5, pp. 2432-2440, 2013.
- [3] W. Cao, et al, "A beam scanning leaky-wave slot antenna with enhanced scanning angle range and flat gain characteristic using composite phase-shifting transmission line," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62.11, pp. 5871-5875, 2014.
- [4] P. Hudec, P. Petr, and J. Vojtech, "Multimode Adaptable Microwave Radar Sensor Based on Leaky-Wave Antennas," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017.
- [5] Karmokar, K. Debabrata, and Y. Jay Guo, "Planar leaky-wave antennas for low-cost radar," *Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 2017 *IEEE-APS Topical Conference on. IEEE*, 2017.
- [6] S.-T. Yang and H. Ling, "Application of a microstrip leaky wave antenna for range-azimuth tracking of humans," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 10.6, pp. 1384-1388, 2013.

# **Investigation of Performance Changes of Leaky Wave Antennas in the Aerodynamic Heating Phenomenon of Hypersonic Projectiles**

**Sh. Tavanaeipour, M. A. Jozveh Vaziri\***

Imam Hossein University

(Received: 09/12/2017, Accepted: 05/07/2018)

## **Abstract**

In this study, the effect of aerodynamic heating has been investigated on the performance of leaky wave antennas in hypersonic projectiles. For this purpose, first the projectile's surface temperature is obtained using aerodynamic simulations. Then, with thermal simulation of the leaky wave antenna designed in the X frequency band, its temperature is calculated with the assumption that the upper surface of the antenna lies on the exterior surface of the projectile. The next step is to investigate the changes in antenna's performance by studying the changes in its shape and the properties of its materials. The most significant change in the performance is observed for the S11 parameter, which has a frequency shift of around 140 MHz at 1880 Kelvin. Finally, changes of the main beam direction as well as the level of the first sidelobe have been studied with respect to temperature changes

**Keywords:** Aerodynamic Heating, Leaky Wave Antenna, Hypersonic Regime, Temperature.

---

\* Corresponding author E-mail: mohammad.ali.vaziri@chmail.ir